Politechnika Śląska

Rozszerzone streszczenie rozprawy doktorskiej

Analyses of selected methods for limiting the spread of air pollutants in occupied ventilated rooms

Autor:

Seyedkeivan Nateghi

Promotor:

dr hab. inż. Jan Kaczmarczyk, prof. PŚ

Politechnika Śląska

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Katedra Techniki Cieplnej, Wentylacyjnej i Odpylania Powietrza

Gliwice, 2025

Wykaz załączonych publikacji

Rozprawa składa się z 6 artykułów naukowych wymienionych poniżej, podzielonych na rozdziały 2 i 3. Pełne teksty publikacji znajdują się w załącznikach.

Rozdział 2: Strategie wentylacyjne i inteligentne sterowanie

Paper 1: Grygierek, Krzysztof, **Seyedkeivan Nateghi**, Joanna Ferdyn-Grygierek, and Jan Kaczmarczyk. "Controlling and limiting infection risk, thermal discomfort, and low indoor air quality in a classroom through natural ventilation controlled by smart windows." Energies 16, no. 2 (2023): 592. IF: 3, DOI: 10.3390/en16020592

Paper 2: **Nateghi, Seyedkeivan**, and Jan Kaczmarczyk. "Multi-objective optimization of window opening and thermostat control for enhanced indoor environment quality and energy efficiency in contrasting climates." Journal of Building Engineering 78 (2023): 107617. IF: 6.7, DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107617

Paper 3: **Nateghi, Seyedkeivan**, Amirmohammad Behzadi, Jan Kaczmarczyk, Pawel Wargocki, and Sasan Sadrizadeh. "Optimal control strategy for a cutting-edge hybrid ventilation system in classrooms: Comparative analysis based on air pollution levels across cities." Building and Environment 267 (2025): 112295. IF: 7.1, DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.112295

Rozdział 3: Lokalne strategie kontroli zakażeń

Paper 4: **Nateghi, Seyedkeivan**, Jan Kaczmarczyk, Ewa Zabłocka-Godlewska, and Wioletta Przystaś. "Investigating the Impact of Physical Barriers on Air Change Effectiveness and Aerosol Transmission Under Mixing Air Distribution." Building and Environment (2025): 112676. IF: 7.1, DOI: 10.1016/j.buildenv.2025.112676

Paper 5: **Nateghi, Seyedkeivan**, and Jan Kaczmarczyk. "Compatibility of integrated physical barriers and personal exhaust ventilation with air distribution systems to mitigate airborne infection risk." Sustainable Cities and Society 103 (2024): 105282. IF: 10.5, DOI: 10.1016/j.scs.2024.105282

Paper 6: **Nateghi, Seyedkeivan**, Shahrzad Marashian, Jan Kaczmarczyk, and Sasan Sadrizadeh. "Resource-efficient design of integrated personal exhaust ventilation and physical barriers for airborne transmission mitigation: A numerical and experimental evaluation." Building and Environment 268 (2025): 112336. IF: 7.1, DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.112336

Rozdział 1: Wprowadzenie

Motywacja i tło: Jakość powietrza wewnętrznego (IAQ) stała się istotnym problemem zdrowia publicznego, szczególnie w gęsto zaludnionych przestrzeniach takich jak sale lekcyjne, biura i placówki opieki zdrowotnej. Ponieważ ludzie spędzają około 90% swojego czasu w pomieszczeniach, jakość powietrza w tych środowiskach bezpośrednio wpływa na komfort, wydajność pracy oraz zdrowie, w tym ryzyko przenoszenia chorób zakaźnych. Pomimo posiadania tej wiedzy wiele pomieszczeń nie jest właściwie wentylaowanych – często z powodu źle zaprojektowanych systemów lub ich nieodpowiedniej eksploatacji – co wpływa na to, że nie odpowiadają one aktualnym wzorcom użytkowania ani nie uwzględniają zmieniających się źródeł zanieczyszczeń. Te ograniczenia stały się szczególnie widoczne podczas pandemii COVID-19, która uwydatniła nieskuteczność konwencjonalnych systemów HVAC w ograniczaniu przenoszenia patogenów drogą powietrzną w zatłoczonych pomieszczeniach. W środowisku szkolnym, gdzie typowe są długotrwała obecność i przebywanie ludzi w bliskiej odległości od siebie, skutki niskiej jakości powietrza są szczególnie odczuwalne. Chociaż wysiłki na rzecz poprawy IAQ zostały zintensyfikowane, często koncentrują się one jedynie na jednym aspekcie – np. wentylacji lub filtracji – bez uwzględnienia komfortu cieplnego, zużycia energii czy zrównoważonego rozwoju. Strategie oparte na filtracji oraz powszechne użycie środków ochrony osobistej (PPE), mimo że skuteczne w ograniczaniu zanieczyszczeń, mogą znacznie zwiększyć zużycie energii, ilość odpadów oraz emisję gazów cieplarnianych. Niniejsza praca odpowiada na potrzebę kompleksowej oceny różnych strategii wentylacyjnych i środków kontroli zakażeń, zwłaszcza w środowiskach edukacyjnych, analizując ich wpływ na zdrowie, komfort, zapotrzebowanie energetyczne oraz zrównoważony rozwój.

Zanieczyszczenia powietrza wewnętrznego: Zanieczyszczenia powietrza w pomieszczeniach – pochodzące zarówno z wewnętrznych, jak i zewnętrznych źródeł – mogą znacząco wpływać na zdrowie, komfort i produktywność ludzi. Można je podzielić na trzy główne grupy: chemiczne (np. LZO, CO, NO_2, ozon, formaldehyd), pyłowe ($PM_{2.5}$, PM_{10}) oraz biologiczne (bakterie, wirusy, grzyby, alergeny). Szczególną uwagę w czasie pandemii COVID-19 zyskały zanieczyszczenia biologiczne ze względu na przenoszenie SARS-CoV-2 drogą powietrzną. Dodatkowo uwagę zwraca się także na dwutlenek węgla (CO_2), chociaż w typowych stężeniach występujących w pomieszczeniach nie stanowi bezpośrednim zagrożenia, który jest powszechnie stosowany jako wskaźnik jakości wentylacji i IAQ.

Metody ograniczania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza wewnętrznego: Utrzymanie zdrowego środowiska wewnętrznego wymaga dobrze zaprojektowanej wentylacji oraz strategii uzupełniających. Podejścia wentylacyjne obejmują:

- **Wentylację naturalną**, która opiera się na pasywnym przepływie powietrza; koszty inwestycyjne są niskie, ale jej skuteczność zależy od klimatu i jakości powietrza zewnętrznego.
- **Wentylację mechaniczną**, zapewniającą kontrolowany przepływ powietrza i filtrację; jest bardziej niezawodna, lecz energochłonna.
- **Wentylację hybrydową**, która łączy obie powyższe metody, przełączając tryby pracy w zależności od warunków wewnętrznych i zewnętrznych, co umożliwia zarządzanie jakością powietrza efektywne także pod kątem energooszczędności.

Rodzaj i rozmieszczenie nawiewników również odgrywają kluczową rolę w kształtowaniu przepływu powietrza, wpływając na rozprzestrzenianie się patogenów oraz efektywność ich usuwania lub akumulacji.

- **Wentylacja mieszająca (MV)** jest jedną z najczęściej stosowanych strategii w pomieszczeniach. W tym podejściu powietrze wprowadzane jest ze stosunkowo dużą prędkością przez nawiewniki sufitowe lub ścienne tak, aby rozcieńczać zanieczyszczenia i utrzymać jednolite warunki środowiskowe.
- **Wentylacja wyporowa (DV)** stanowi alternatywę, dostarczając chłodniejsze powietrze przy małej prędkości na poziomie podłogi i wykorzystując stratyfikację termiczną do transportu ciepła i zanieczyszczeń ku sufitowym wywiewom. Taki układ zmniejsza mieszanie powietrza czystego z zanieczyszczonym.
- **Wentylacja spersonalizowana (PV)** to rozwijające się rozwiązanie polegające na lokalnym nawiewie powietrza, bezpośrednio w strefie oddychania użytkownika, które zmniejsza narażenie na wspólne zanieczyszczenia.

Inne metody ograniczania zakażeń obejmują:

- Środki ochrony osobistej (PPE), takie jak maseczki i przyłbice, które zmniejszają ryzyko zakażenia, ale generują odpady i nie nadają się do długoterminowego stosowania.

- Przegrody fizyczne, np. ścianki działowe, które mogą ograniczyć transmisję kropelek na krótkim dystansie, choć ich skuteczność zależy od odpowiedniego projektu i kompatybilności z wentylacją.
- Technologie filtracyjne i oczyszczania powietrza, w tym filtry HEPA i przenośne oczyszczacze, które zwiększają skuteczność usuwania zanieczyszczeń, ale mogą powodować większe opory przepływu i zwiększone zużycie energii.
- Nowoczesne technologie, takie jak systemy sterowania oparte na sztucznej inteligencji, dezynfekcja UV-C oraz monitoring środowiskowy w czasie rzeczywistym, oferują inteligentne i adaptacyjne rozwiązania do kontroli zakażeń.

Konsekwencje zarządzania jakością powietrza wewnętrznego (IAQ) i kontroli zakażeń: Zarządzanie IAQ wiąże się z szeregiem kompromisów:

- Komfort cieplny może zostać obniżony przy dużych strumieniach wentylacyjnych, zwłaszcza w ekstremalnych warunkach klimatycznych.
- Efektywność energetyczna może spaść przy zwiększonej liczbie wymian powietrza lub zastosowaniu wysokosprawnych filtrów.
- Zrównoważony rozwój środowiskowy może być zagrożony przez wysokie zużycie materiałów i energii w przypadku wielu technologii kontroli poziomu zanieczyszczeń powietrza. Coraz częściej do oceny całościowego wpływu stosuje się narzędzia oceny cyklu życia (LCA).

Cele i zakres pracy: Niniejsza rozprawa ma na celu pogłębienie wiedzy i rozwój skutecznych oraz zrównoważonych strategii poprawy jakości powietrza wewnętrznego i ograniczania ryzyka zakażeń drogą powietrzną, szczególnie w środowiskach edukacyjnych. W analizach technicznych metod ograniczania rozprzestrzeniania zanieczyszczeń ujęto wszystkie istotne czynniki wpływające na efektywność tych rozwiązań pod kątem ochrony zdrowia, komfortu użytkowników, efektywności energetycznej a także zrównoważonego rozwoju. Główne cele badania to:

- Ocena różnych strategii wentylacyjnych w zakresie utrzymania jakości powietrza wewnętrznego i redukcji ryzyka zakażeń w gęsto zaludnionych pomieszczeniach takich jak sale lekcyjne.

- Zbadanie lokalnych środków zaradczych, takich jak przegrody fizyczne, wentylacja spersonalizowana, maseczki i przenośne oczyszczacze, w ograniczaniu transmisji aerozoli w takich przestrzeniach.
- Analiza wpływu strategii poprawy IAQ i kontroli zakażeń na środowisko, zużycie energii i komfort użytkowników.

Na podstawie tych celów sformułowano następujące pytania badawcze:

1. Czy wentylacja naturalna wykorzystująca automatycznie otwierane okna może zapewnić wystarczającą jakość powietrza i kontrolę zakażeń w salach lekcyjnych?
2. Jakie są konsekwencje energetyczne i cieplne wentylacji naturalnej i jak można je zoptymalizować?
3. Jak zaprojektować systemy wentylacji hybrydowej, aby skutecznie reagowały na zmienne warunki jakości powietrza wewnętrznego i zewnętrznego?
4. Jaki wpływ mają przegrody fizyczne na skuteczność wentylacji i transmisję zanieczyszczeń w pomieszczeniach wentylowanych?
5. Czy połączenie lokalnej wentylacji wyciągowej z przegrodami fizycznymi może zwiększyć skuteczność kontroli zakażeń?

Aby odpowiedzieć na te pytania, zaproponowano następujące hipotezy:

- Wentylacja naturalna przez inteligentne okna może kontrolować ryzyko zakażeń w warunkach braku możliwości zastosowania wentylacji mechanicznej.
- Wielokryterialna optymalizacja wybranych parametrów systemu wentylacyjnego pozwala na jednoczesne zarządzanie IAQ, komfortem cieplnym i zapotrzebowaniem na energię.
- Odpowiednia integracja wentylacji naturalnej i mechanicznej (wentylacja hybrydowa) może poprawić jakość środowiska wewnętrznego i zmniejszyć zużycie energii.
- Przegrody fizyczne mogą zmniejszyć ryzyko przenoszenia patogenów drogą powietrzną między użytkownikami.
- Lokalne strategie, takie jak osobista wentylacja wyciągowa w połączeniu z przegrodami fizycznymi, mogą znacząco ograniczyć narażenie na zanieczyszczenia.

W realizacji powyższych celów i potwierdzenia postawionych hipotez, niniejsza rozprawa oparta została na sześciu recenzowanych publikacjach naukowych oraz jednym dodatkowym

rozdziale, które w całości stanowią kompleksowe analizy technicznych metod ograniczania rozprzestrzeniania zanieczyszczeń. Prace te zaprezentowano w logicznej kolejności – począwszy od zaawansowanej kontroli wentylacji naturalnej, przez integrację systemów hybrydowych i mechanicznych, a następnie przechodząc do eksperymentalnych i numerycznych ocen lokalnych strategii kontroli zakażeń, takich jak przegrody fizyczne i osobista wentylacja wyciągowa. Ostatnim elementem rozprawy jest analiza cyklu życia (LCA), oceniająca wpływ środowiskowy różnych strategii ograniczania zakażeń.

Rozdział 2: Inteligentne sterowanie i metody wentylacji

Zakres i metodyka: Rozdział ten podsumowuje trzy badania (Artykuły 1–3) poświęcone opracowaniu, optymalizacji i ocenie inteligentnych oraz hybrydowych strategii wentylacyjnych w salach lekcyjnych. Wszystkie trzy badania wykorzystują to samo środowisko: salę lekcyjną na najwyższym piętrze trzykondygnacyjnego, energooszczędnego budynku szkolnego. Symulowano różne rozwiązania wentylacji – wentylację naturalną wykorzystującą efekt kominowy i infiltrację oraz systemy mechaniczne z pompą ciepła typu PTHP i filtrami. Symulację obciążenia wewnętrznego pomieszczenia przeprowadzono dla 30 uczniów, zakładając jednorodny wewnętrzny zysk ciepła oraz emisję CO_2. Scenariusze użytkowania oświetlenia oraz parametry izolacji cieplnej odzieży (clo) dostosowano do warunków klimatycznych charakterystycznych dla Warszawy, Bangkoku, Delhi oraz Sztokholmu. Ujednolicenie kluczowych zmiennych wejściowych umożliwia spójne porównanie wariantów oraz wyciąganie obiektywnych wniosków dotyczących wpływu klimatu na warunki wewnętrzne.

Inteligentne sterowanie oknami dla wentylacji naturalnej: W artykule [1] przedstawiono algorytm sterowania inteligentnymi oknami, oparty na monitorowaniu stężenia CO_2, temperatury powietrza oraz ryzyka zakażenia w pomieszczeniu. System regulował stopień otwarcia okien (uchylenie lub pełne otwarcie) w odpowiedzi na przekroczenie ustalonych progów granicznych, mając na celu minimalizację czasu trwania warunków niekomfortowych: termicznego dyskomfortu (PMV poza zakresem −0,7 do +0,7), pogorszonej jakości powietrza (CO_2 > 1200 ppm) oraz zwiększonego potencjału transmisji zakażeń (wskaźnik reprodukcji R_0 > 1) Symulowano różne scenariusze w celu oceny wpływu interwencji takich jak użycie maseczek, oczyszczaczy powietrza oraz zmniejszenia liczby osób w pomieszczeniu. Wyniki wykazały, że konwencjonalne, ręczne otwieranie okien prowadziło do znacznego nagromadzenia CO_2 (>2500 ppm), natomiast inteligentny sterownik obniżał stężenia do

akceptowalnych poziomów (600–1200 ppm) przez 80% czasu obecności uczniów. Pomimo poprawy IAQ i komfortu cieplnego, ryzyko zakażenia pozostawało wysokie. Uwzględnienie wskaźnika R_0 w logice sterowania dało jedynie umiarkowaną poprawę kontroli zakażeń. Dodatkowe środki, takie jak oczyszczacze powietrza i maseczki, okazały się niezbędne: dwa oczyszczacze zredukowały czas z $R_0 > 1$ do zaledwie 1,6%, a zmniejszenie liczby uczniów o połowę dało podobny efekt. Zaobserwowano jednak wzrost zapotrzebowania na energię – szczególnie 190% wzrost zużycia na ogrzewanie – co podkreśla konflikt między IAQ a zrównoważonym zużyciem energii. Badanie wykazało, że sama optymalizacja wentylacji naturalnej nie wystarcza do skutecznej kontroli zakażeń w salach lekcyjnych.

Wielokryterialna optymalizacja stopnia otwarcia okien i termostatów: Artykuł 2 rozszerzył strategię sterowania oknami poprzez zastosowanie algorytmu genetycznego do wielokryterialnej optymalizacji pięciu parametrów: ustawień termostatu dla ogrzewania i chłodzenia, temperatury, przy której otwierane są okna oraz powierzchni ich otwarcia. Badanie uwzględniało trzy cele – roczne zapotrzebowanie na energię, średnie stężenie CO_2 i komfort cieplny (PPD) – w dwóch kontrastujących klimatach: Warszawy i Bangkoku. Wyniki wykazały konieczność ustanowienia kompromisów pomiędzy tymi celami. W Warszawie optymalizacja pod kątem IAQ często zwiększała zużycie energii z powodu konieczności ogrzewania powietrza zimą, natomiast w Bangkoku, gdzie ogrzewanie nie było potrzebne, można było osiągnąć lepsze rezultaty. Wybrane przypadki, oparte na różnych wagach funkcji celu, pokazały znaczenie przyjętychpriorytetów. Przypadek 3, nadający równe znaczenie wszystkim celom, osiągnął najlepszy ogólny balans. Przypadek 4, faworyzujący oszczędność energii, utrzymywał wyższe progi termostatu i skracał czas otwarcia okien. Zgodnie z oczekiwaniami w Przypadku 5, priorytetowo traktującym IAQ, czas otwarcia okien był wydłużony.

Wentylacja hybrydowa z ograniczeniami zanieczyszczenia powietrza zewnętrznego: Artykuł 3 omawia ograniczenia stosowania wentylacji naturalnej w silnie zanieczyszczonych obszarach miejskich, proponując inteligentną strategię wentylacji hybrydowej, zintegrowaną z systemem zarządzania energią (EMS – Energy Management System). System EMS dynamicznie przełączał tryby wentylacji pomiędzy naturalnym a mechanicznym, w zależności od warunków wewnętrznych (temperatura powietrza) oraz zewnętrznych poziomów zanieczyszczeń powietrza ($PM_{2.5}$, NO_2). Wentylacja mechaniczna opierała się na jednostkach typu PTHP (Packaged Terminal Heat Pump) wyposażonych w filtry, których skuteczność filtracyjna ulegała obniżeniu w czasie, co wymagało cyklicznej konserwacji i ich wymiany. Wentylacja naturalna była dopuszczana wyłącznie w przypadkach spełnienia lokalnych kryteriów jakości powietrza, zgodnie z ustalonymi progami granicznymi stężenia $PM_{2.5}$ – 60

µg/m³ dla Delhi, 40 µg/m³ dla Warszawy oraz 15 µg/m³ dla Sztokholmu. Wyniki symulacji wskazują, że wysokie poziomy zanieczyszczenia powietrza istotnie ograniczały możliwość stosowania wentylacji naturalnej. W Delhi tryb ten był możliwy do wykorzystania jedynie przez 11% rocznego czasu, podczas gdy w Warszawie przez 44%, a w Sztokholmie – 31%. Zaobserwowane różnice wynikały zarówno z lokalnych poziomów zanieczyszczeń, jak i przyjętych wartości progowych. Pomimo wyższej czystości powietrza w Sztokholmie, mniej rygorystyczny próg w Warszawie umożliwiał częstsze otwieranie okien.

Analiza wyników optymalizacji wykazała, że zastosowanie strategii wentylacji hybrydowej, sterowanej przez EMS, zapewniało wyraźnie lepsze efekty niż podejścia oparte wyłącznie na wentylacji mechanicznej lub naturalnej. W porównaniu do scenariusza referencyjnego (wyłącznie wentylacja mechaniczna), osiągnięto redukcję zużycia energii na poziomie 65% w Warszawie, 57% w Sztokholmie i 13% w Delhi. Jednocześnie znaczącej poprawie uległa jakość powietrza wewnętrznego – w Warszawie udział czasu spędzanego w kategorii I (zgodnie z EN 16798-1) wzrósł do 43%, z wcześniejszej kategorii III. Komfort cieplny pozostał w dopuszczalnych granicach – zgodność z rekomendowanym zakresem PMV (−0,7 do +0,7) wyniosła 99% w Delhi oraz ponad 80% w miastach europejskich, pomimo nieznacznych lokalnych pogorszeń w krótkich okresach przejściowych

Rozdział 3: Lokalne strategie ograniczania ryzyka infekcji

Zakres i cele: Niniejszy rozdział koncentruje się na projektowaniu, ocenie i optymalizacji lokalnych strategii kontroli zakażeń, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowania przegród fizycznych (PB – Physical Barriers) oraz indywidualnych systemów wyciągowych (PE – Personal Exhaust). Pierwsze badanie (Artykuł 4) analizuje wpływ przegród biurkowych na rozkład pola prędkości powietrza oraz rozprzestrzenianie się aerozoli w warunkach wentylacji mieszającej. Ocenie poddano wpływ przegród na efektywność wentylacji (ACE – Air Change Effectiveness) oraz potencjalne negatywne zjawiska, takie jak tworzenie stref stagnacji i recyrkulacja zanieczyszczeń.

W Artykule 5 rozwinięto tę koncepcję, proponując strategię zintegrowaną PB+PE. Skuteczność systemu oceniano w różnych warunkach dystrybucji powietrza – zarówno przy wentylacji mieszającej, jak i wyporowej. Wyniki wykazały silne uzależnienie wydajności systemu od kierunkowości przepływu powietrza oraz efektywności wychwytywania zanieczyszczeń u źródła.

Trzecie badanie (Artykuł 6) rozszerza analizę o aspekt zrównoważonego projektowania. Łącząc walidację eksperymentalną z symulacjami CFD, dokonano optymalizacji systemu PB+PE pod kątem wydajności usuwania zanieczyszczeń oraz efektywności wykorzystania zasobów, modyfikując parametry geometryczne (wysokość przegród) i operacyjne (intensywność wyciągu)

Metody badawcze: W tym rozdziale zastosowano zintegrowaną metodologię oceny skuteczności systemów kontroli zakażeń, obejmującą analizę gazów znacznikowych (CO_2, N_2O), pomiary stężenia aerozoli i bioaerozoli, a także symulacje numeryczne z wykorzystaniem modelowania CFD. Efektywność wymiany powietrza (ACE – Air Change Effectiveness) określano metodą zaniku stężenia gazów znacznikowych. Generację aerozoli realizowano za pomocą nebulizatora Collisona, natomiast w badaniach bioaerozoli jako biologicznego substytutu użyto bakterii *Micrococcus luteus*. Obliczenia CFD przeprowadzono z wykorzystaniem modelu cząstek dyskretnych (DPM – Discrete Phase Model), uwzględniającego dyfuzję molekularną (ruchy Browna) oraz zachowanie cząstek w zależności od liczby Stokesa, co pozwalało na realistyczne odwzorowanie trajektorii i depozycji cząstek w warunkach turbulentnego przepływu powietrza. Wszystkie eksperymenty i symulacje wykonano w pełnowymiarowym modelu sali lekcyjnej, wyposażonym w sześć termicznie aktywnych manekinów reprezentujących obecność uczniów. Zastosowany modułowy układ stanowisk roboczych umożliwiał rekonfigurację przestrzeni w celu testowania różnych scenariuszy rozmieszczenia przegród PB i elementów wyciągowych PE. Warunki wentylacyjne utrzymywano na stałym poziomie w całym cyklu badań: krotność wymiany powietrza (ACH) = 3 h^{-1}, temperatura nawiewu 20°C, wilgotność względna 40%. Do analizy porównawczej wdrożono cztery strategie wentylacyjne: trzy warianty wentylacji mieszającej (MV1–MV3) oraz jeden system wentylacji wyporowej (DV – Displacement Ventilation). Konfiguracje te umożliwiły ocenę wpływu mechanizmu dystrybucji powietrza na skuteczność lokalnych strategii kontroli zakażeń

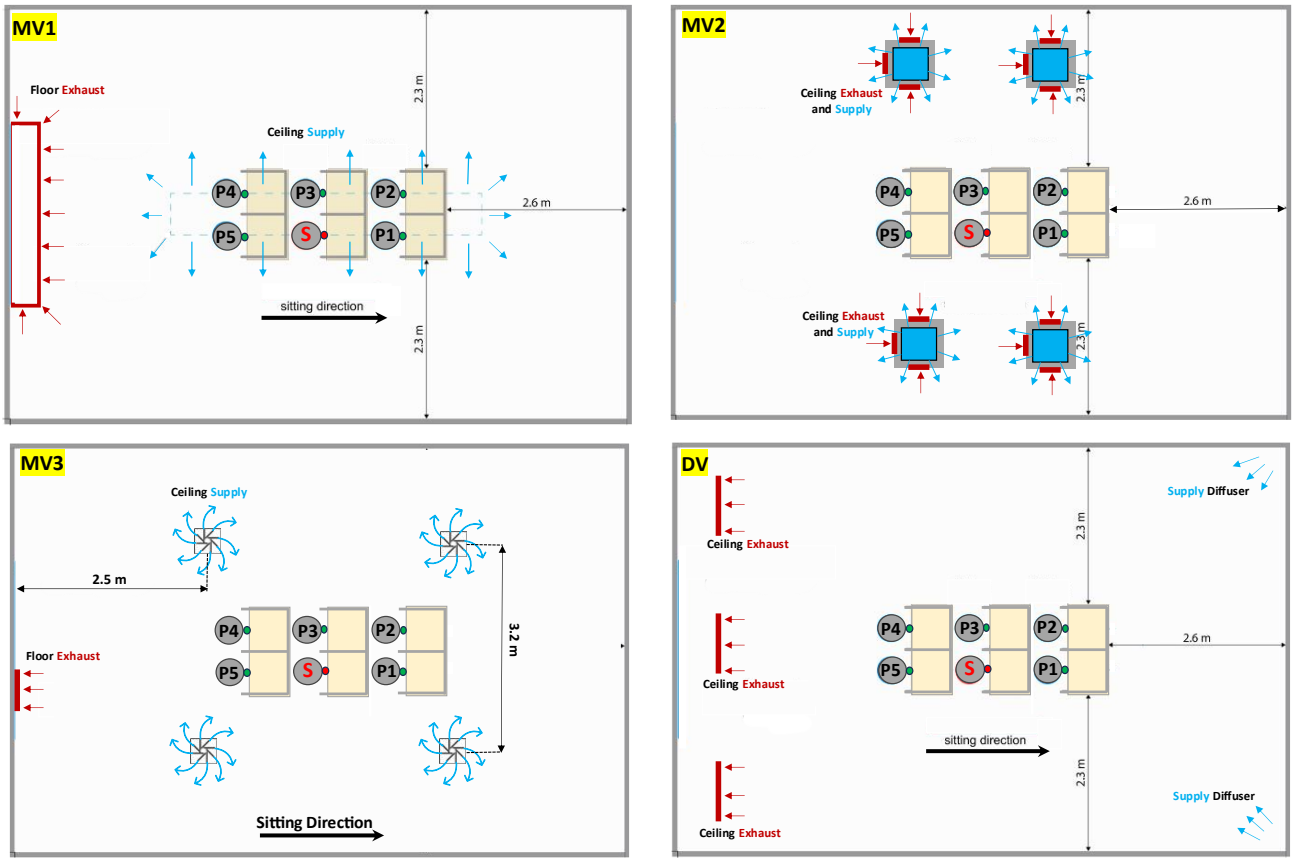

Fig. 7. Konfiguracja testowej sali lekcyjnej dla różnych systemów rozdziału powietrza[1]: MV1, MV2, MV3, and DV

Wpływ przegród fizycznych na wentylację i transport aerozoli: Artykuł 4 oceniał wpływ akrylowych przegród biurkowych (PB) na charakterystykę przepływu powietrza i rozprzestrzenianie się aerozoli w warunkach wentylacji mieszającej. Analizie poddano dwa systemy dystrybucji powietrza – MV2 (laminarny nawiew z sufitowym wywiewem) oraz MV3 (strumień wirowy). Eksperymenty przeprowadzono w konfiguracjach z obecnością przegród oraz bez nich, co umożliwiło porównanie wpływu fizycznych barier na jakość środowiska wewnętrznego. Wyniki wykazały, że obecność przegród w istotny sposób wpływała na rozkład lokalnej efektywności wymiany powietrza (ACE). Szczególnie w systemie MV2 zaobserwowano znaczne spadki ACE w wybranych punktach pomiarowych, co wskazuje na powstawanie stref stagnacji powietrza i potencjalne akumulowanie się zanieczyszczeń. W systemie MV3, charakteryzującym się silniejszym mieszaniem turbulentnym, efekt ten był mniej wyraźny.

[1] Konwencja nazewnictwa systemów wentylacyjnych w tej pracy różni się od stosowanej w odpowiadających publikacjach..

Analiza wskaźnika redukcji stężenia aerozoli (CR – Concentration Reduction) wykazała, że skuteczność przegród zależy od charakterystyki przepływu powietrza. W systemie MV3 wartości CR w większości punktów utrzymywały się powyżej 0,6, co świadczy o efektywnym ograniczeniu rozprzestrzeniania się aerozoli. Natomiast w systemie MV2 zaobserwowano ujemne wartości CR w obszarach peryferyjnych, co sugeruje, że przegrody mogły powodować przemieszczanie zanieczyszczeń w kierunku osób narażonych.

Pomiar bioaerozoli (CFU – Colony Forming Units) z użyciem bakterii *Micrococcus luteus* potwierdził zaobserwowane tendencje. W systemie MV2 stężenie CFU było niższe w bezpośrednim sąsiedztwie źródła emisji, natomiast wzrastało w strefach bocznych i tylnych. W przypadku MV3 rozkład CFU był bardziej jednorodny, co wskazuje na skuteczniejsze ograniczenie transmisji cząstek zakaźnych.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że skuteczność przegród fizycznych jest ściśle powiązana z parametrami i geometrią systemu wentylacyjnego. Przegrody mogą efektywnie wspierać kontrolę rozprzestrzeniania się aerozoli, o ile są odpowiednio dostosowane do charakterystyki przepływu powietrza. W przeciwnym razie mogą przyczyniać się do pogorszenia warunków higienicznych poprzez niekorzystną redystrybucję zanieczyszczeń.

Wydajność zintegrowanych systemów PE+PB w różnych typach wentylacji: Artykuł 5 przedstawia zintegrowany system PE+PB, zaprojektowany w celu usuwania zanieczyszczonego powietrza bezpośrednio ze strefy w której powstają zanieczyszczenia. Testy przeprowadzono dla trzech systemów wentylacyjnych (MV1, MV2, DV), porównując kilka konfiguracji: stan bazowy (tylko wentylacja ogólna), dodatkowo przegrody (PB) oraz przegrody z lokalną wentylacją wyciągową (PB+PE). Konfiguracja zawierająca tylko przegrody dała mieszane rezultaty. W systemach DV i MV2 przegrody zmniejszyły narażenie nawet o 63%, natomiast w MV1 pogorszyły warunki – podwajając stężenie zanieczyszczeń w pobliżu źródła (P2), co wskazuje na recyrkulację i uwięzienie zanieczyszczeń z powodu istnienia fizycznej przeszkody. Gdy dodano system PE z przepływem 9 L/s na osobę, ekspozycja zmniejszyła się we wszystkich konfiguracjach. W MV1 system PE obniżył poziom N_2O w punkcie P2 o 60%, neutralizując negatywny wpływ samej przegrody. System PE+PB również dobrze sprawdził się w systemie DV, dodatkowo zwiększając jego już wysoką skuteczność. Analiza przepływu ujawniła, że 9 L/s na osobę to skuteczny punkt pracy, zapewniający znaczną poprawę w stosunku do 4 L/s, bez komplikacji i strat energetycznych związanych z 12 L/s.

Optymalizacja projektu PE+PB pod kątem efektywności zasobowej: W Artykule 6 skoncentrowano się na optymalizacji systemu PE+PB w celu zapewnienia zrównoważonej wydajności. Symulacje CFD zostały zweryfikowane względem danych eksperymentalnych i wykorzystane do analizy przepływu powietrza, strug termicznych oraz skuteczności usuwania cząstek w warunkach MV3. Głównym celem było określenie minimalnej wysokości przegrody i przepływu wyciągowego, które pozwalają zachować wysoką skuteczność. Kluczowe wyniki wykazały, że zmniejszenie wysokości przegrody z 65 cm do 45 cm spowodowało jedynie 5% obniżenie skuteczności usuwania cząstek. Dalsze obniżenie do 25 cm skutkowało większym spadkiem wydajności (RAR ≈ 0,83), co sugeruje, że 45 cm to praktyczny i zasobooszczędny projekt. Podobnie zmniejszenie przepływu wyciągowego z 9 do 6 L/s skutkowało jedynie niewielkim spadkiem efektywności (o 6%), natomiast dalsze zmniejszenie pogarszało wydajność. Podsumowując, Artykuł 6 wykazał, że przy odpowiedniej optymalizacji możliwe są znaczne oszczędności materiałowe i energetyczne bez utraty skuteczności kontroli zakażeń. Zweryfikowany model CFD stanowi również narzędzie do przyszłego skalowania i dostosowywania systemu do różnych układów pomieszczeń lub warunków wentylacyjnych.

Rozdział 4: Ocena cyklu życia dla wybranych strategii kontroli zakażeń

Zakres i cele: Pandemia COVID-19 przyspieszyła rozwój i wdrażanie różnych strategii kontroli zakażeń – od modernizacji wentylacji po środki ochrony osobistej. Większość ocen skupiała się jednak wyłącznie na skuteczności zdrowotnej, pomijając długoterminowe skutki środowiskowe. Niniejszy rozdział wypełnia tę lukę poprzez zastosowanie metodyki oceny cyklu życia (LCA) do analizy wpływu różnych strategii kontroli zakażeń na środowisko.

Metodyka i ramy analizy: Przeprowadzono kompleksową analizę LCA przy użyciu programu OpenLCA (v2.3.1) oraz bazy danych Environmental Footprint (EF) v3.0. Analiza objęła cały cykl życia – od wydobycia surowców, przez produkcję, użytkowanie, aż po utylizację. Wpływy środowiskowe zostały przeliczone na jeden wskaźnik wydajności wyrażony w Punktach (Pt), z zastosowaniem procesu normalizacji i ważenia kategorii wpływu. Szczegółowo przeanalizowano trzy główne strategie:

- **Oczyszczacze powietrza:** Dwa przenośne urządzenia z filtrami HEPA, pracujące w trybie ciągłym z regularną wymianą filtrów.
- **Jednorazowe maseczki:** Codzienne użycie przez 30 uczniów w godzinach lekcyjnych.

- **Zintegrowany system PE+PB:** Na podstawie zbudowanego prototypu użytego w badaniach Rozdziału 3, założono akrylowe przegrody i lokalne jednostki wyciągowe.

Każdą strategię zastosowano w klasie liczącej 30 uczniów, przy założeniu 6 godzin zajęć dziennie, 5 dni w tygodniu, przez 9 miesięcy roku szkolnego. We wszystkich przypadkach przyjęto stały poziom tła wentylacji mechanicznej mieszającej wynoszący 148 L/s (3 wymiany powietrza na godzinę – ACH). Wpływ transportu materiałów został pominięty z uwagi na jego marginalne znaczenie, co potwierdzają wcześniejsze badania.

Analiza ryzyka zakażenia: Skuteczność zdrowotną każdej strategii oceniono za pomocą modelu Wellsa-Rileya, koncentrując się na podstawowym współczynniku reprodukcji (R_0), jako miarze prawdopodobieństwa zakażenia w typowej 45-minutowej lekcji. Wyniki wyraźnie różnicują skuteczność analizowanych scenariuszy:

- **Przypadek 1 (tylko wentylacja):** $R_0 > 1{,}25$ (najwyższe ryzyko)
- **Przypadek 2 (wentylacja + oczyszczacze):** $R_0 \approx 0{,}75$
- **Przypadek 3 (wentylacja + maseczki):** $R_0 \approx 0{,}45$
- **Przypadek 4 (wentylacja + maseczki + oczyszczacze):** $R_0 \approx 0{,}27$
- **Przypadek 5 (wentylacja + PE+PB):** $R_0 \approx 0{,}36$

Wyniki te potwierdzają, że strategie złożone z kilku metod (Przypadek 4) zapewniają najwyższą skuteczność kontroli zakażeń, ale również podkreślają wysoką efektywność systemu PE+PB.

Całkowity ślad środowiskowy: Wyniki LCA zostały zestawione w postaci jednopunktowych wskaźników wpływu środowiskowego (Pt) dla każdej strategii:

- **Przypadek 1 (tylko wentylacja):** ~0,06 Pt (najmniejszy wpływ)
- **Przypadek 2 (wentylacja + oczyszczacze):** ~0,12 Pt
- **Przypadek 3 (wentylacja + maseczki):** ~0,27 Pt
- **Przypadek 4 (wentylacja + maseczki + oczyszczacze):** ~0,33 Pt (największy wpływ)
- **Przypadek 5 (wentylacja + PE+PB):** ~0,14 Pt

Wyniki te jednoznacznie pokazują, że choć jednorazowe maseczki są skuteczne w ograniczaniu zakażeń, wiążą się z największym obciążeniem środowiskowym. Dla porównania – oczyszczacze powietrza i system PE+PB oferują znacznie bardziej zrównoważone podejście.

Analiza kompromisów z uwzględnieniem wag: Aby zintegrować ryzyko zakażenia i wpływ środowiskowy w jednym narzędziu decyzyjnym, opracowano indeks dwukryterialny (F_ws). Funkcja ta pozwala elastycznie ustalać priorytety między kontrolą zakażeń (R_0) a obciążeniem środowiskowym (Pt), w zależności od kontekstu. Wyniki wykazały, że:

- Gdy priorytetem jest wpływ środowiskowy, optymalna jest wentylacja (Przypadek 1), mimo ograniczonej ochrony zdrowotnej.
- Gdy priorytetem jest kontrola zakażeń, najlepszą strategią jest PE+PB (Przypadek 5), mimo że najniższe R_0 osiąga Przypadek 4.
- Przy równoważnym traktowaniu obu kryteriów, PE+PB (Przypadek 5) okazuje się rozwiązaniem optymalnym, zapewniającym dobrą ochronę zdrowia przy umiarkowanym wpływie na środowisko.

Rozdział ten pokazuje, że nie istnieje jedno uniwersalnie optymalne rozwiązanie w zakresie kontroli zakażeń w pomieszczeniach. W szczególności:

- Maseczki jednorazowe zapewniają silną ochronę, ale mają znaczny wpływ na środowisko.
- Systemy PE+PB oferują kontrolę lokalną przy niskim długoterminowym obciążeniu środowiskowym.
- Oczyszczacze powietrza równoważą umiarkowane zużycie energii z solidną skutecznością w ograniczaniu zakażeń.
- Sama wentylacja jest przyjazna środowisku, ale niewystarczająca do zapobiegania zakażeniom.

Rozdział 5: Wnioski

Niniejsza rozprawa przedstawia kompleksową analizę strategii poprawy jakości środowiska wewnętrznego oraz ograniczania ryzyka zakażeń przenoszonych drogą powietrzną, ze szczególnym uwzględnieniem sal lekcyjnych. Główne wnioski z pracy potwierdzają, że:

- Wentylacja naturalna poprzez automatycznie otwierane okna poprawia jakość powietrza i komfort cieplny, ale sama nie zapewnia wystarczającej kontroli zakażeń w zatłoczonych pomieszczeniach.

- Wielokryterialna optymalizacja pracy okien i ustawień termostatów umożliwia wyważenie zużycia energii, komfortu cieplnego i jakości powietrza w różnych warunkach klimatycznych.
- Kontrola przenikania zanieczyszczeń zewnętrznych poprzez automatycznie sterowaną wentylację hybrydową znacząco poprawia jakość powietrza wewnętrznego, zużycie energii i komfort cieplny w różnych klimatach i poziomach zanieczyszczenia.
- Przegrody fizyczne wpływają na przepływy powietrza i mogą ograniczać rozprzestrzenianie aerozoli wydechowych, lecz ich skuteczność zależy od działania systemu wentylacyjnego i lokalizacji użytkowników.
- Połączenie przegród fizycznych z lokalną wentylacją wyciągową, niezależnie od typu wentylacji i rozmieszczenia użytkowników, znacznie ogranicza transmisję powietrzną, wychwytując zanieczyszczenia u źródła.
- Projekt zorientowany na efektywność zasobową dla systemu PE+PB pozwala ograniczyć zużycie materiałów i energii przy zachowaniu wysokiej skuteczności usuwania zanieczyszczeń.
- Porównawcza analiza cyklu życia wykazała, że system przegród fizycznych z lokalną wentylacją wyciągową zapewnia najbardziej zrównoważoną strategię – wysoką skuteczność ograniczania zakażeń przy umiarkowanym wpływie na środowisko.